



PMT EP USP

# Processamento de materiais metálicos: o caso dos aços para fins eletromagnéticos

Prof. Fernando JG Landgraf



PMT EP USP

# Técnicas de processamento de materiais metálicos

- Extração dos metais (físico-química)
  - Obter os metais a partir dos compostos naturais
- Fusão e refino da composição química (fis-quim)
  - Química: no metal líquido, eliminar impurezas e adicionar elementos de liga
- Solidificação (Transmissão de calor e metalurgia física)
  - : Forma final (fundição), intermediária (lingotamento)
- Conformação mecânica (mecânica e metalurgia física)
  - Laminação, forjamento, extrusão, sinterização
- Tratamento térmico (metalurgia física)

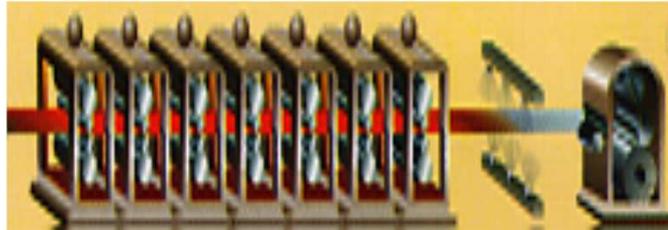


# Fluxo de Produção numa siderúrgica

PMT SP



**Aciaria**



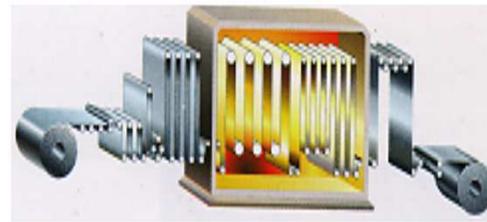
**Laminação a quente**



**Decapagem**



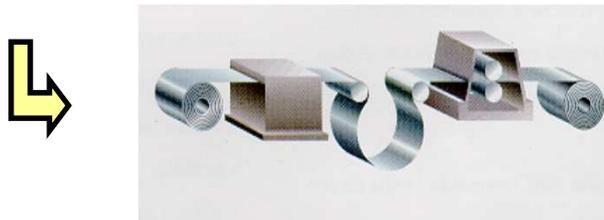
**Laminação a frio**



**Recozimento Contínuo**



**Laminação de encruamento**



**Linha de inspeção e acabamento**

Processamento de aços elétricos  
PMT 3200

**CSN**



PMT EP USP

# Qual processo usar? Depende do produto

Exemplo: MOTORES ELÉTRICOS

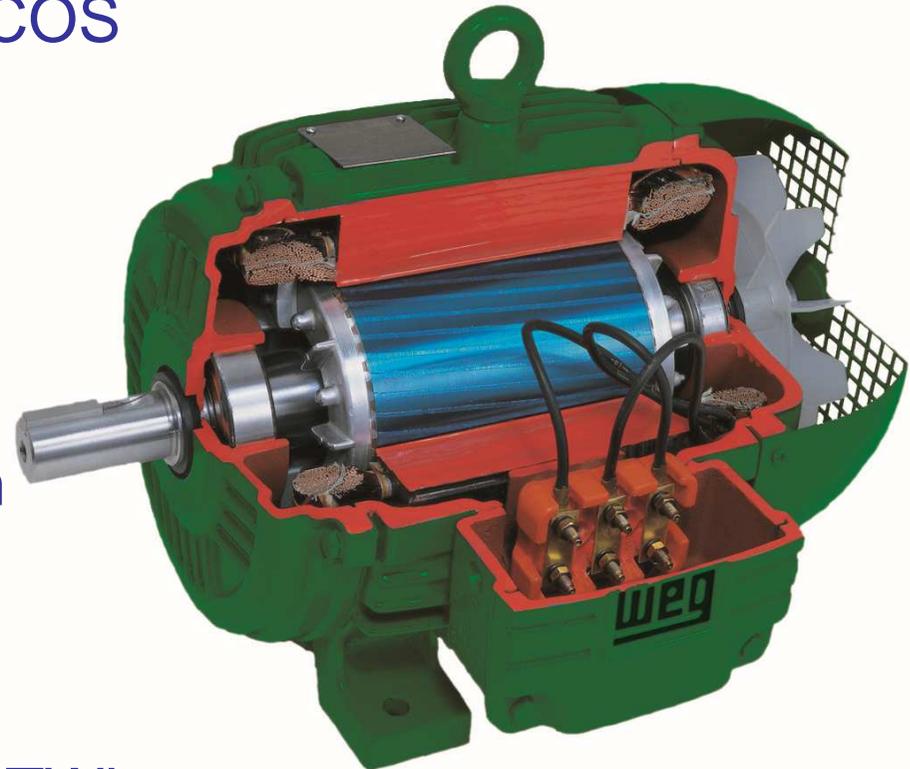
Anualmente, no Brasil:  
50 milhões de  
novos motores elétricos  
(US 4 bilhões)

Consumo de energia: 150TWh

Referência: em 2012

PIB brasileiro: US 1,5 trilhões

Consumo energia elétrica 350 TWh





PMT EP USP

# Aços para fins eletromagnéticos

Nicho de mercado:

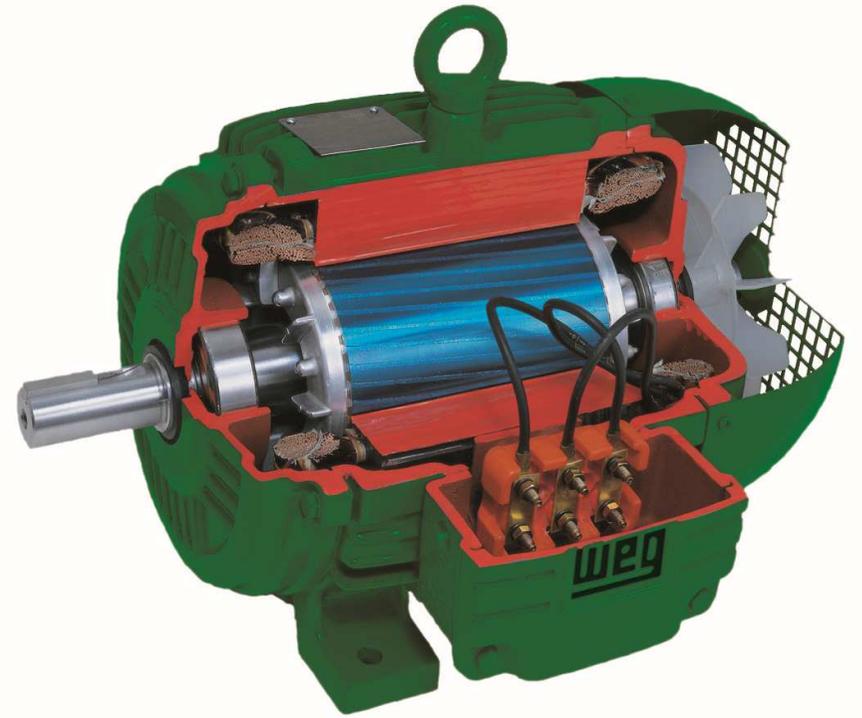
- 1% do aço é consumido em motores.
- Apenas 0,1% do PIB

350.000 toneladas de aços  
Por ano

Negócio de US 1 bilhão,

Cadeia produtiva de dezenas de empresas:

Siderúrgicas, corte, tratamento térmico, fabricantes de motores



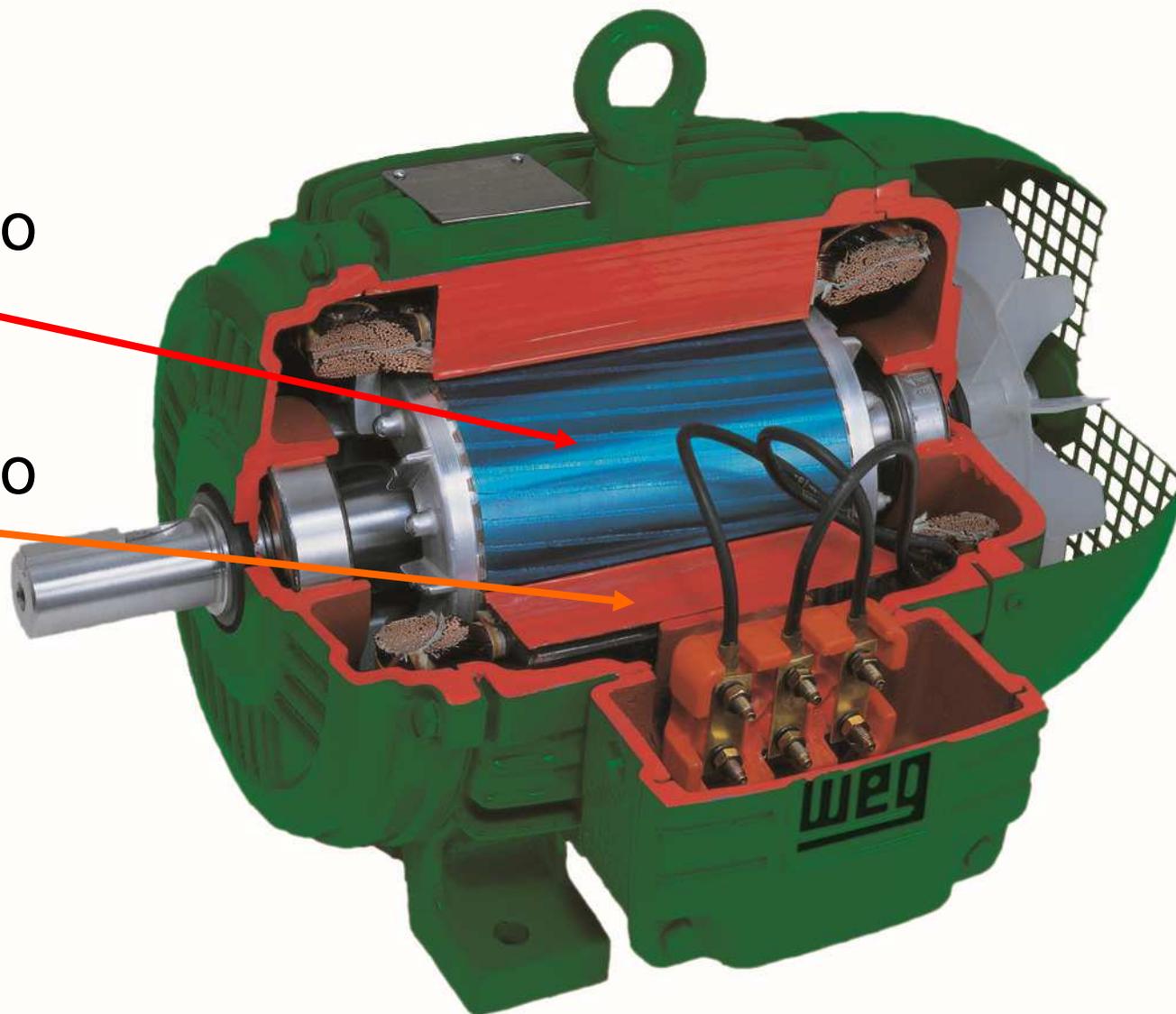


PMT EP USP

## Aços para fins eletromagnéticos

Chapas de aço  
No rotor

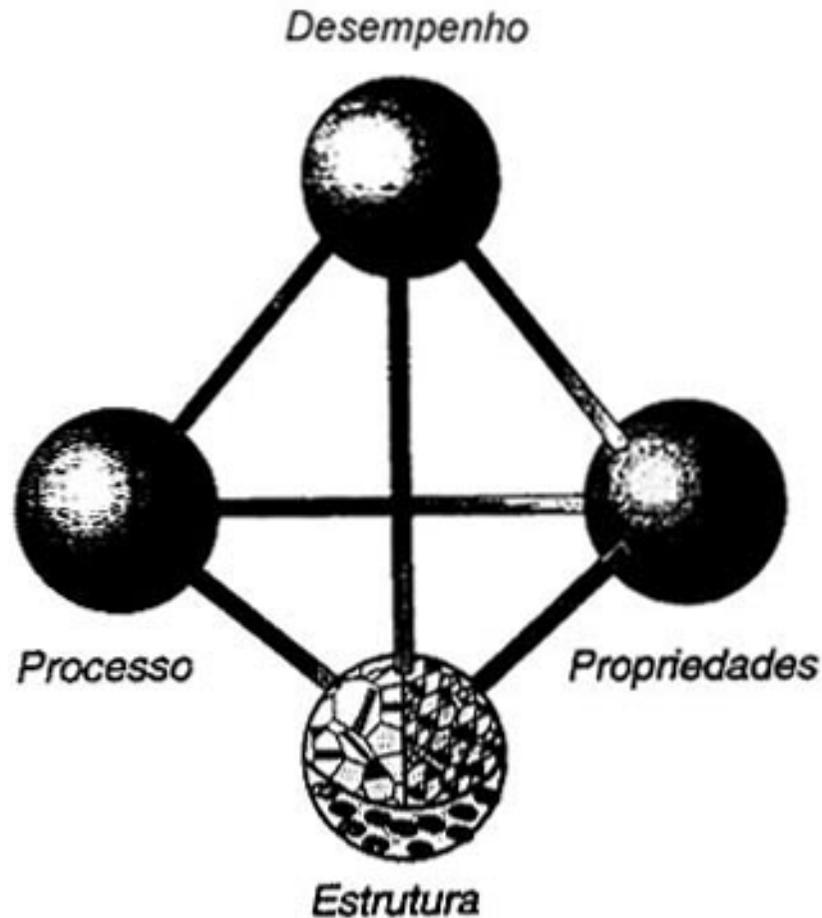
Chapas de aço  
no estator





PMT EP USP

# Tetraedro da ciência e engenharia dos materiais



Processamento de aços elétricos  
PMT 3200

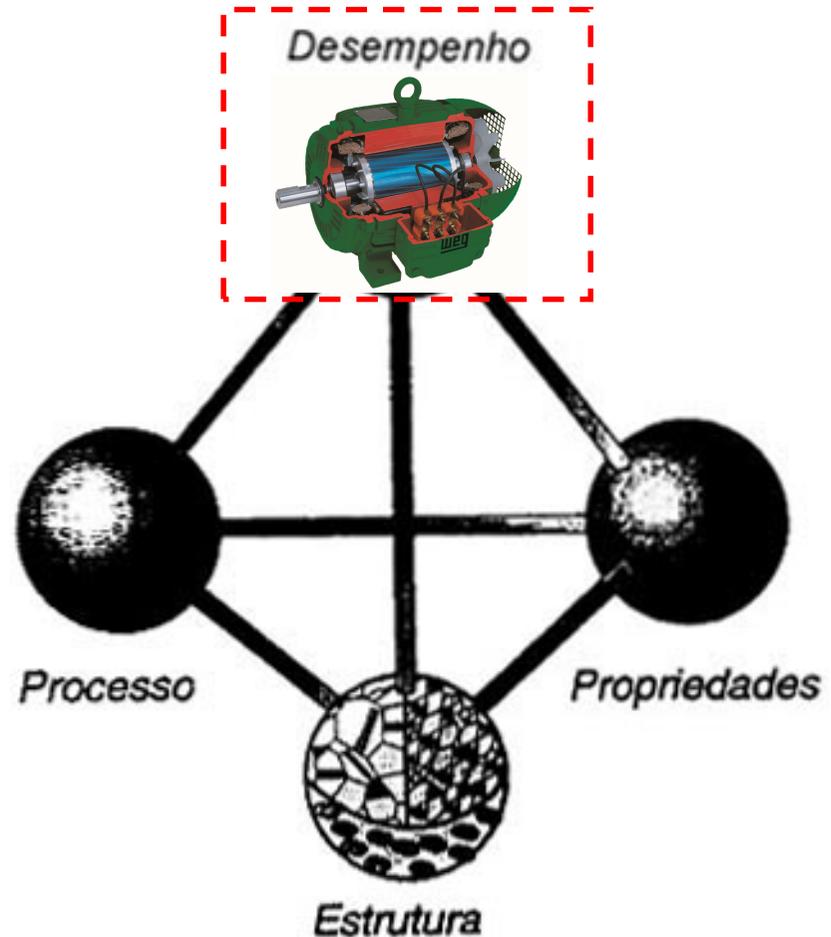


PMT EP USP

# Desempenho

Desempenho do motor:

- Densidade de torque  
( $> 20 \text{ kNm/m}^3$ )
- Consumir a menor energia possível  
(rendimento energético entre 80 e 95%)



Processamento de aços elétricos  
PMT 3200



PMT EP USP

# Propriedades

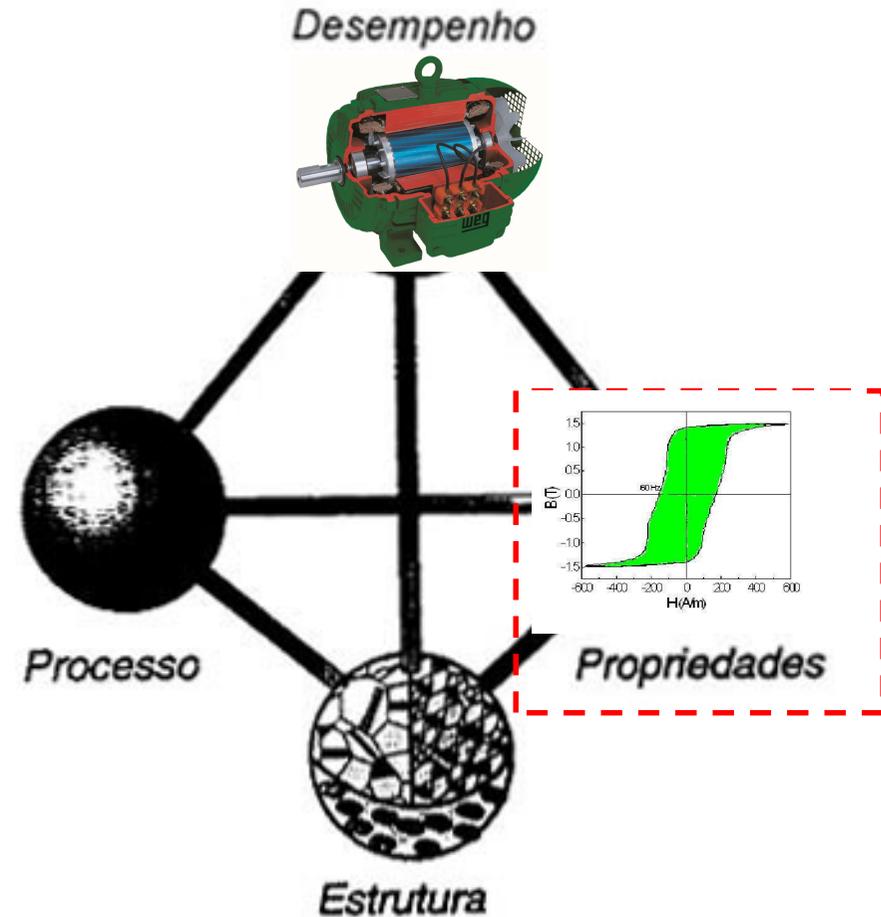
## Propriedades:

Torque depende do fluxo magnético no entreferro,  
Que depende da permeabilidade magnética do aço

$$(\mu_r^{1,5T} > 2000)$$

• Energia é dissipada na histerese magnética.

$$(\underline{P_I^{1,5T} < 5W/kg})$$





PMT EP USP

# Microestrutura

## Microestrutura ideal:

Monofásica

só grãos CCC

Tamanho de grão grande

TG $\approx$ 150  $\mu$ m

“limpo”

reduzir sulfetos e óxidos

S<0,001% O<0,002%

Sem tensões mecânicas

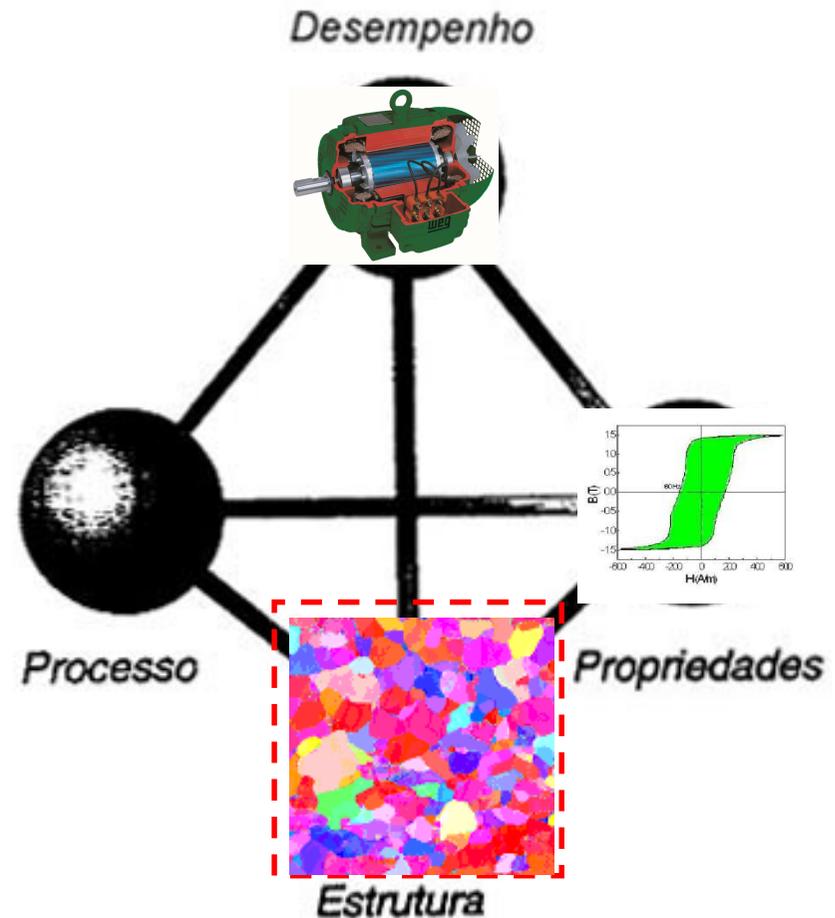
discordâncias < 10<sup>8</sup>cm/cm<sup>3</sup>

Controle da orientação dos cristais

Ideal (001)<uvw>

Processamento de aços elétricos

PMT 3200





PMT EP USP

# Processamento

Refino do metal líquido

remoção do S e O

Lingotamento

produz placa de 250 x 1200 x Z mm

Laminação a quente

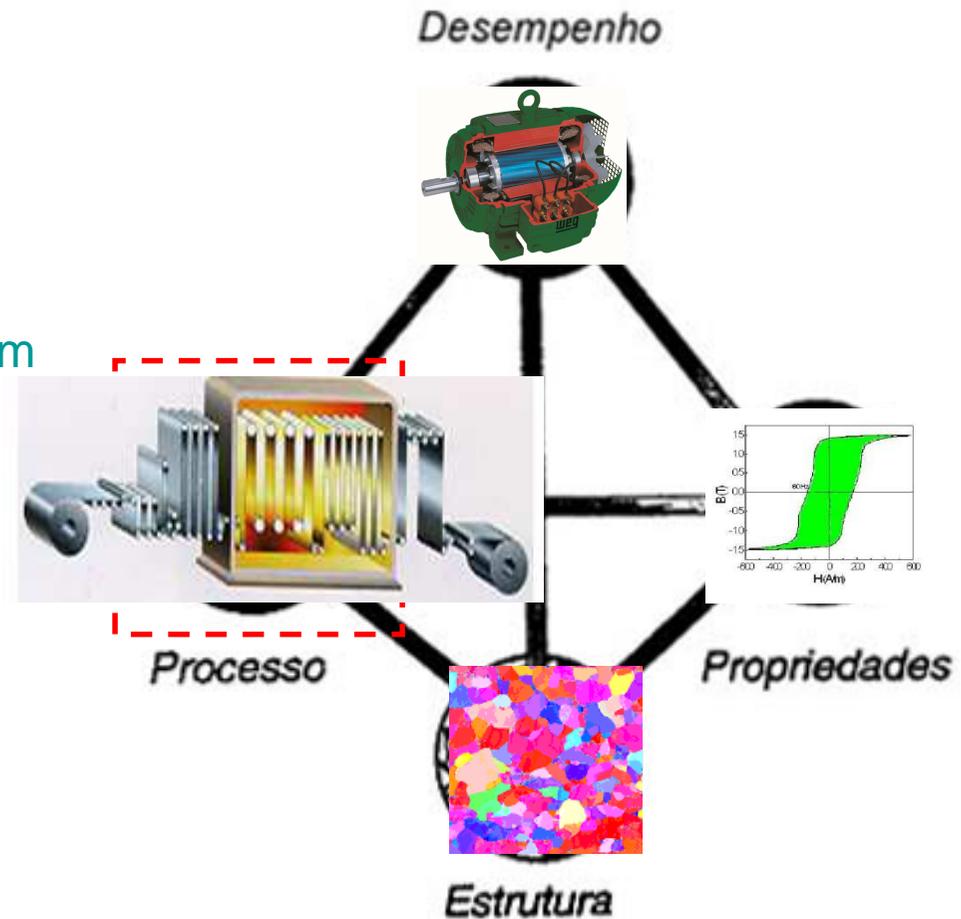
diminui espessura para 2mm

Laminação a frio

diminui espessura para 0,5mm

Recozimento final

TG de 150 $\mu$ m



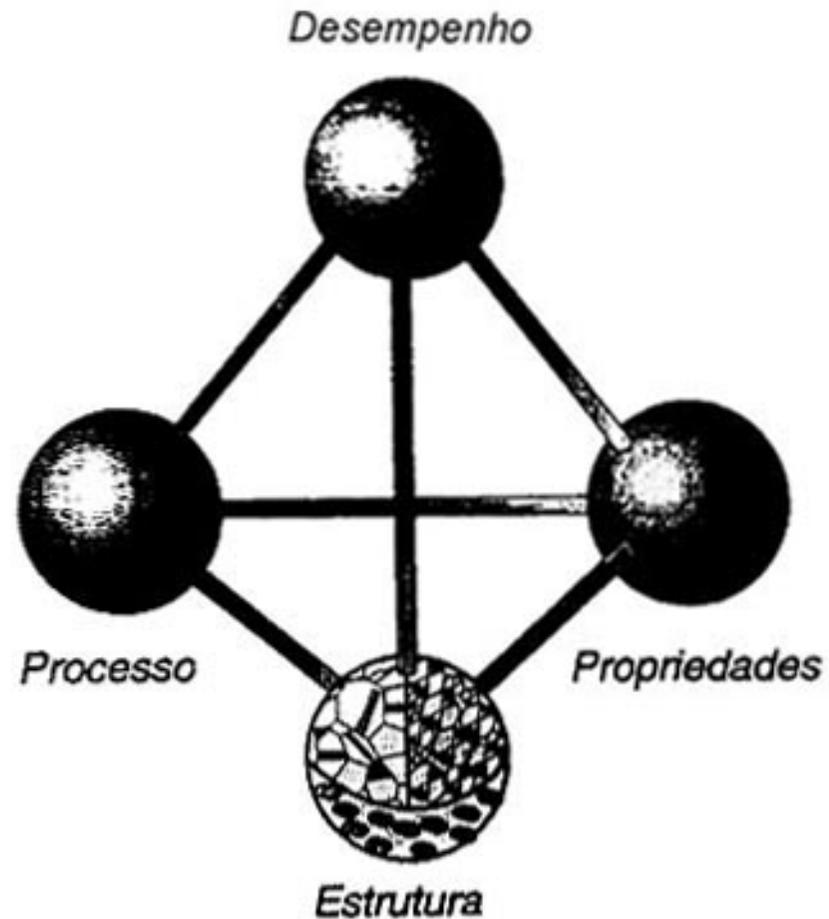
Processamento de aços elétricos  
PMT 3200



PMT EP USP

# Relação estrutura propriedade

Focalizaremos a relação  
entre  
Permeabilidade magnética  
e textura cristalográfica





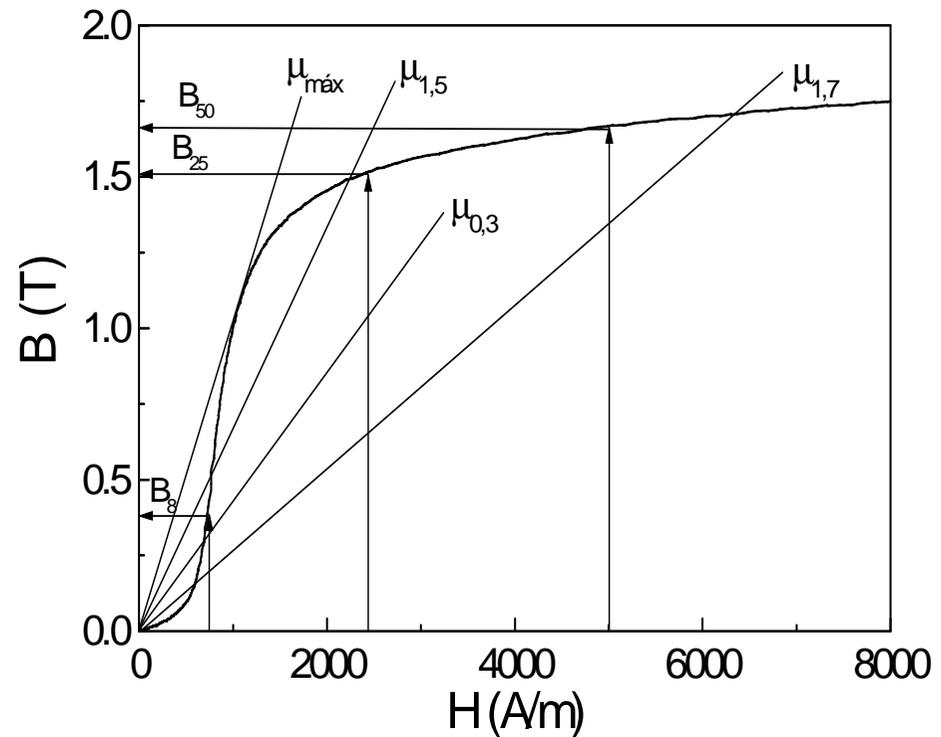
PMT EP USP

# Permeabilidade magnética

Mede o poder amplificador do campo do material

$$\mu_r \equiv \frac{B}{\mu_o H}$$

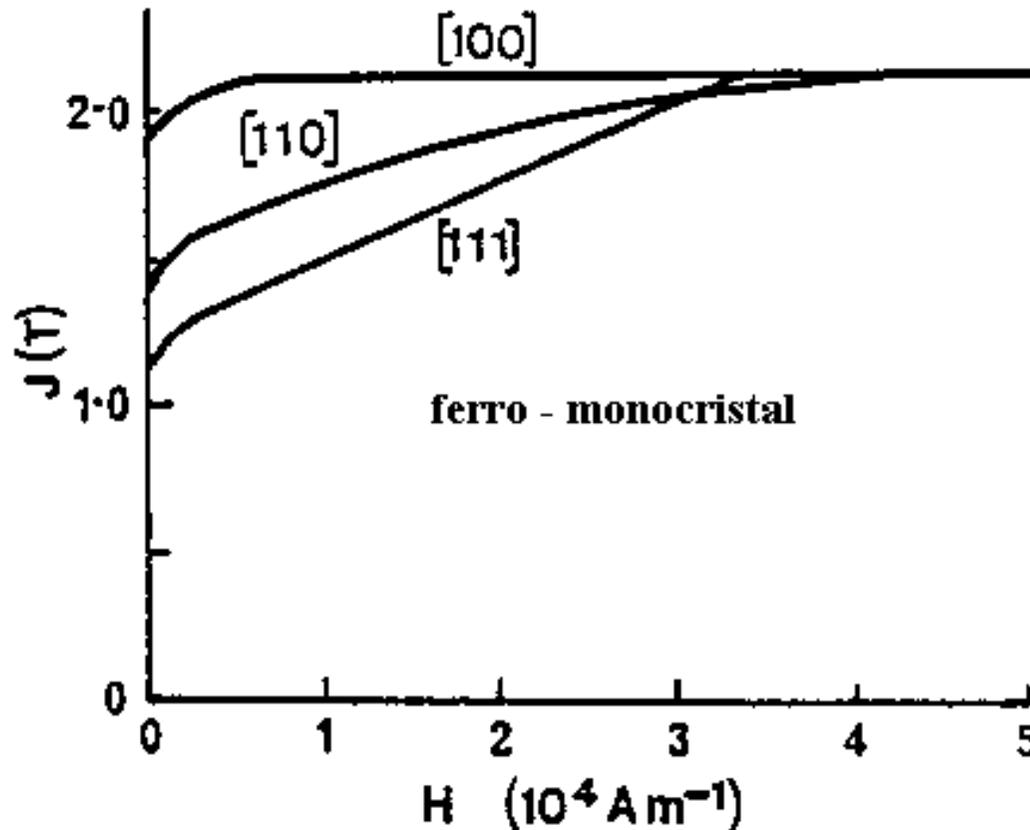
$\mu_{1,5}$  perm. a 1,5T





PMT EP USP

# Anisotropia Magnética



Permabilidade a 1,5T  
Será maior na direção  $[100]$   
Do que nas outras

No Fe, é muito mais fácil magnetizar nas direções  $\langle 100 \rangle$

Processamento de aços elétricos

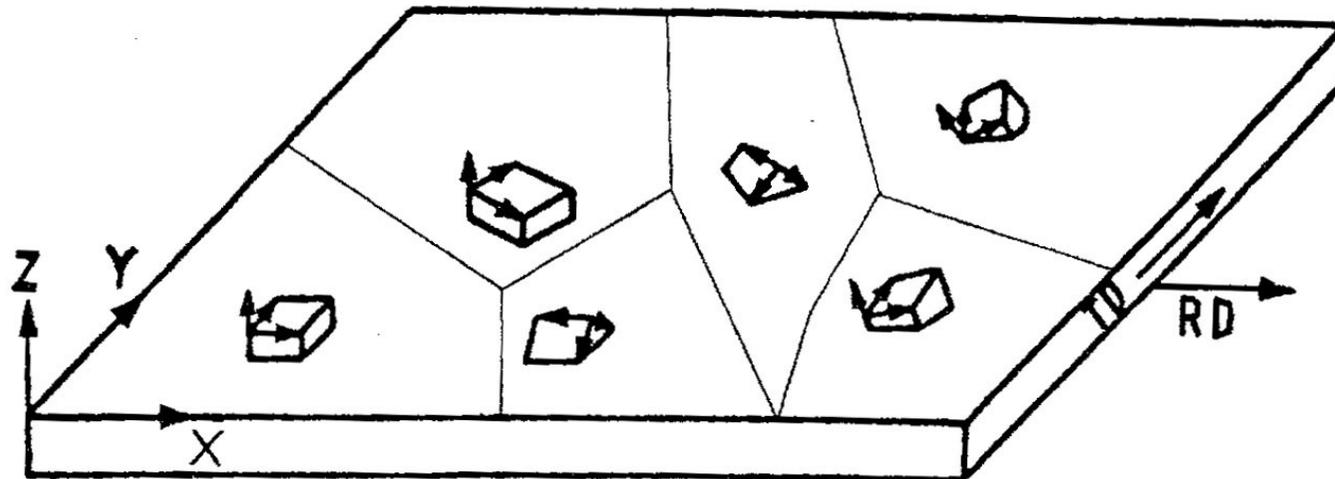
PMT 3200



PMT EP USP

# Aço é policristalino e tem textura

- O campo é aplicado numa direção da chapa
- Como cada grão tem uma orientação,
- cada grão terá permeabilidade diferente.
- Permeabilidade média será a média das permeabilidades dos grãos
- Dependerá de quantos grãos tem direção  $\langle 100 \rangle //$  direção de aplicação do campo.



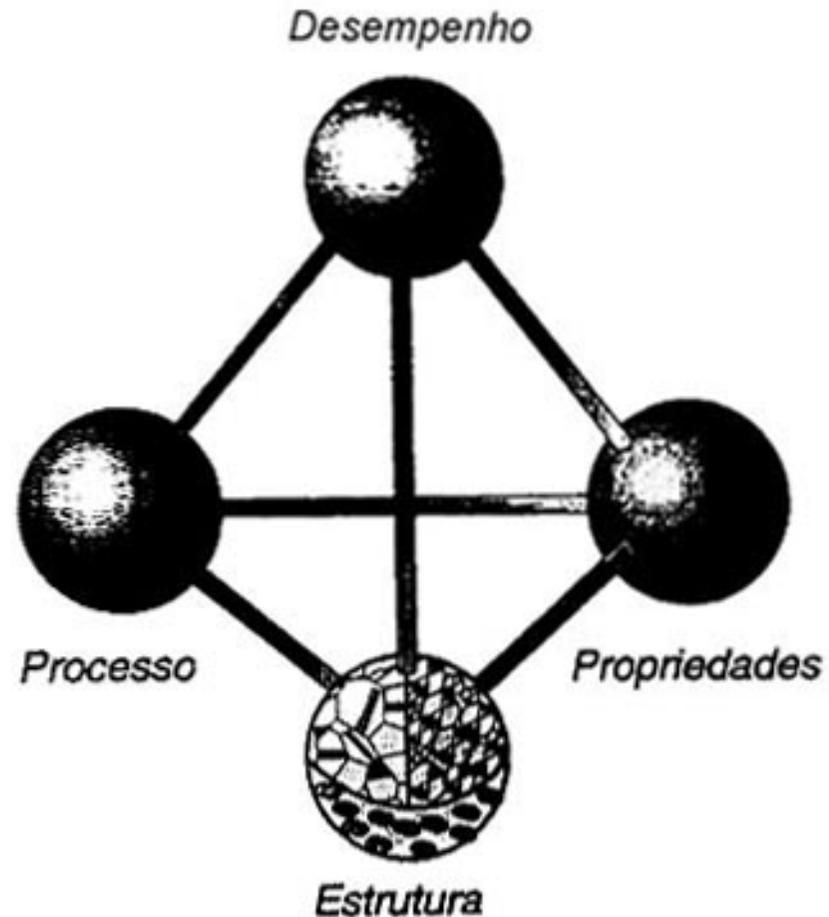


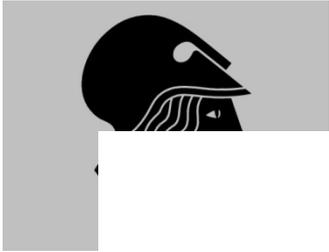
PMT EP USP

# Relação estrutura propriedade

Se quero alta  
Permeabilidade magnética  
Preciso de  
textura cristalográfica  
Com muitos grãos com  
direção  $\langle 100 \rangle //$  campo

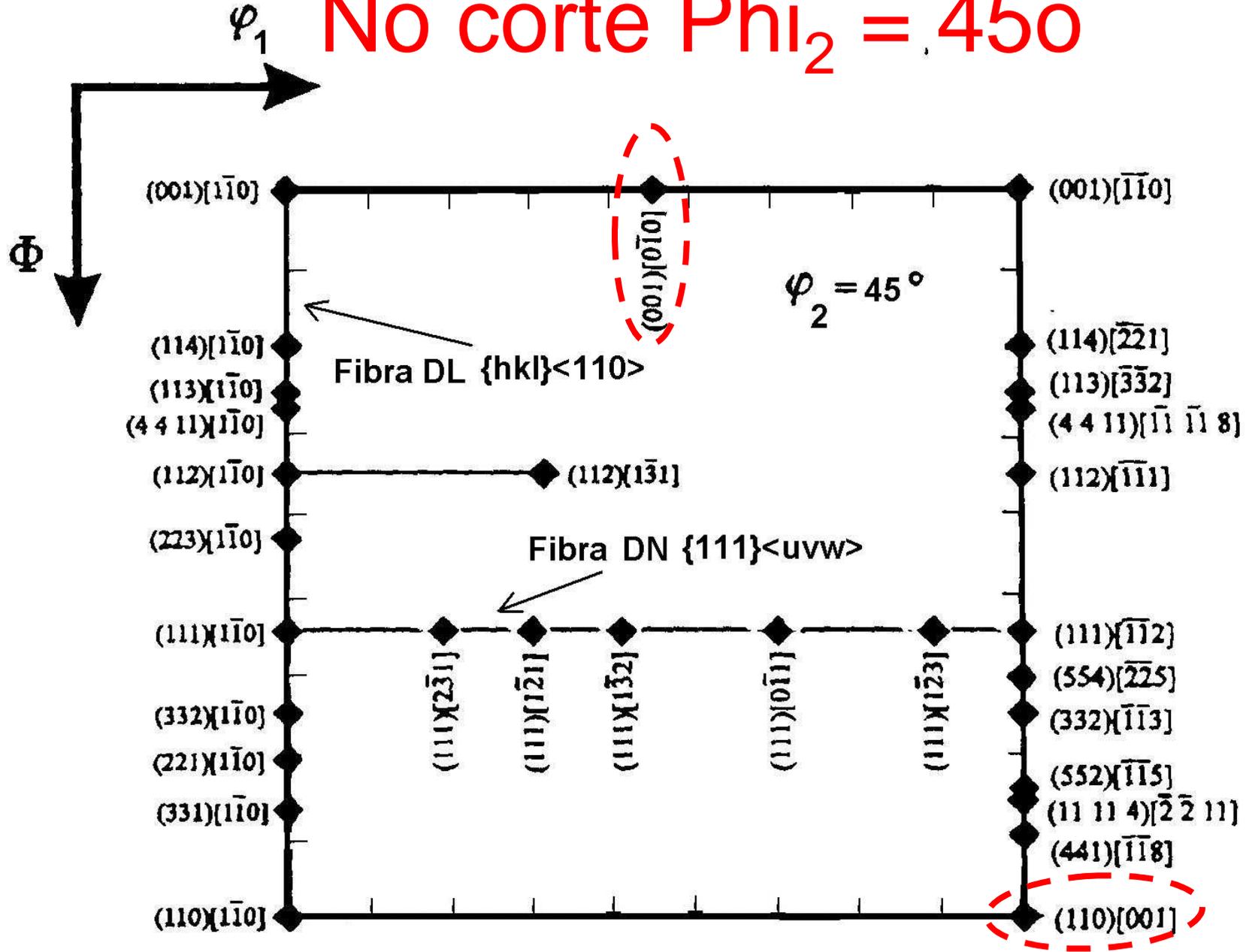
É comum ter campo //  
direção de laminação





PM'

No corte  $\Phi_2 = 45^\circ$

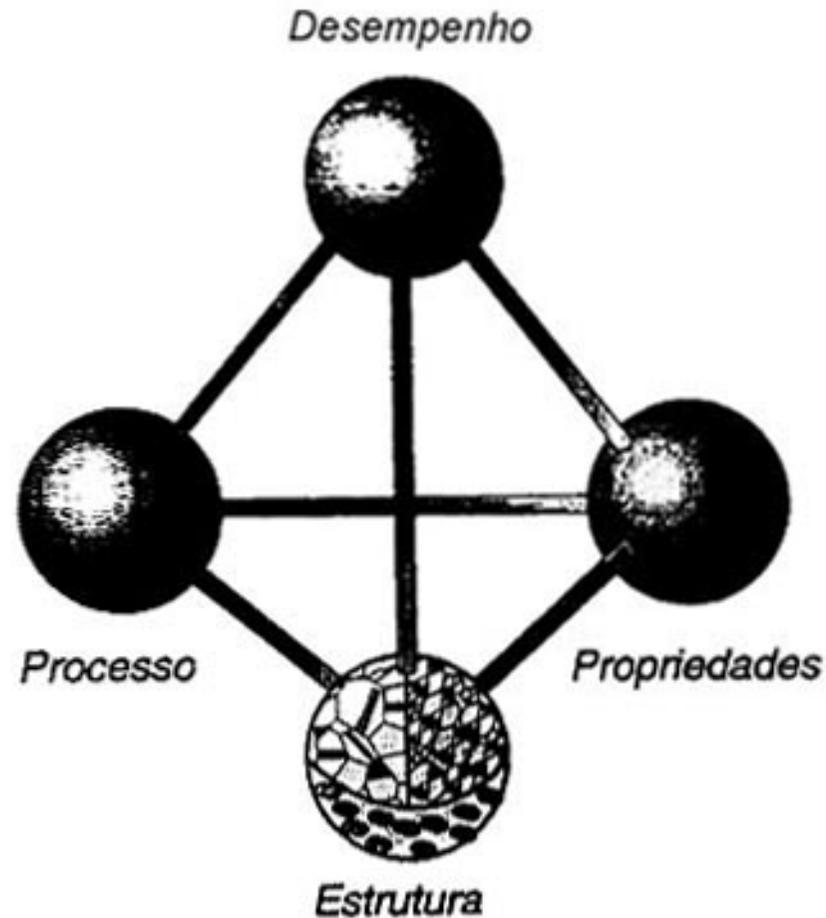




PMT EP USP

# Relação processo-estrutura

Como fazer para ter  
muitos grãos com  
Direção [100]//DL?



Processamento de aços elétricos  
PMT 3200

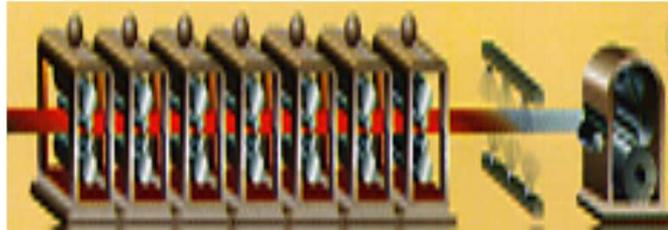
# Controlando a laminação e a recristalização



PMT SP



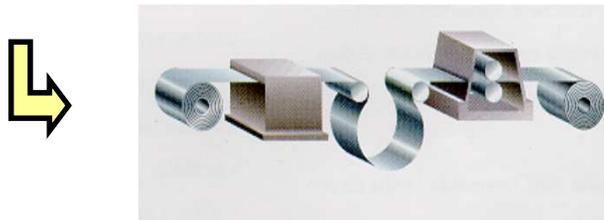
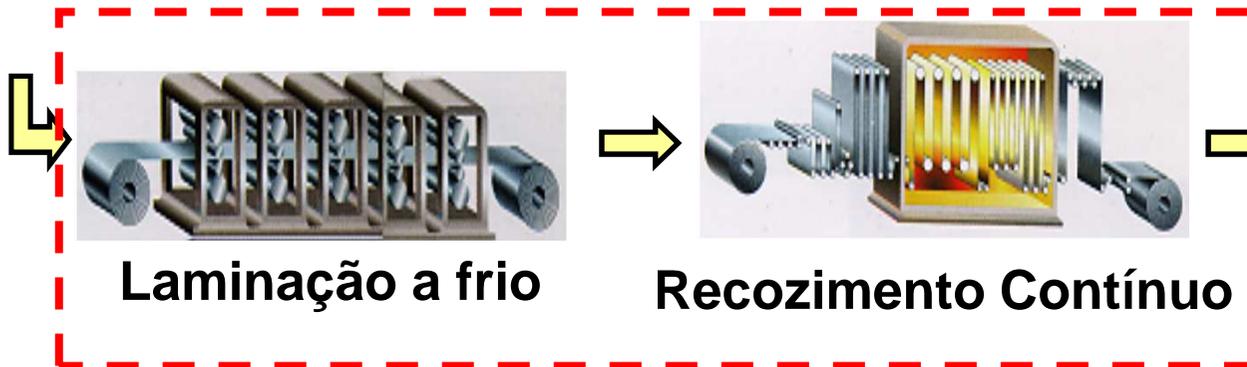
Aciaria



Laminação a quente



Decapagem



Linha de inspeção e acabamento

Processamento de aços elétricos  
PMT 3200

**CSN**



PMT EP USP

# Laminação



## Laminação a frio

Aço entra com 2mm de espessura e sai com 0,5mm, após passar em cinco cadeiras de laminação.

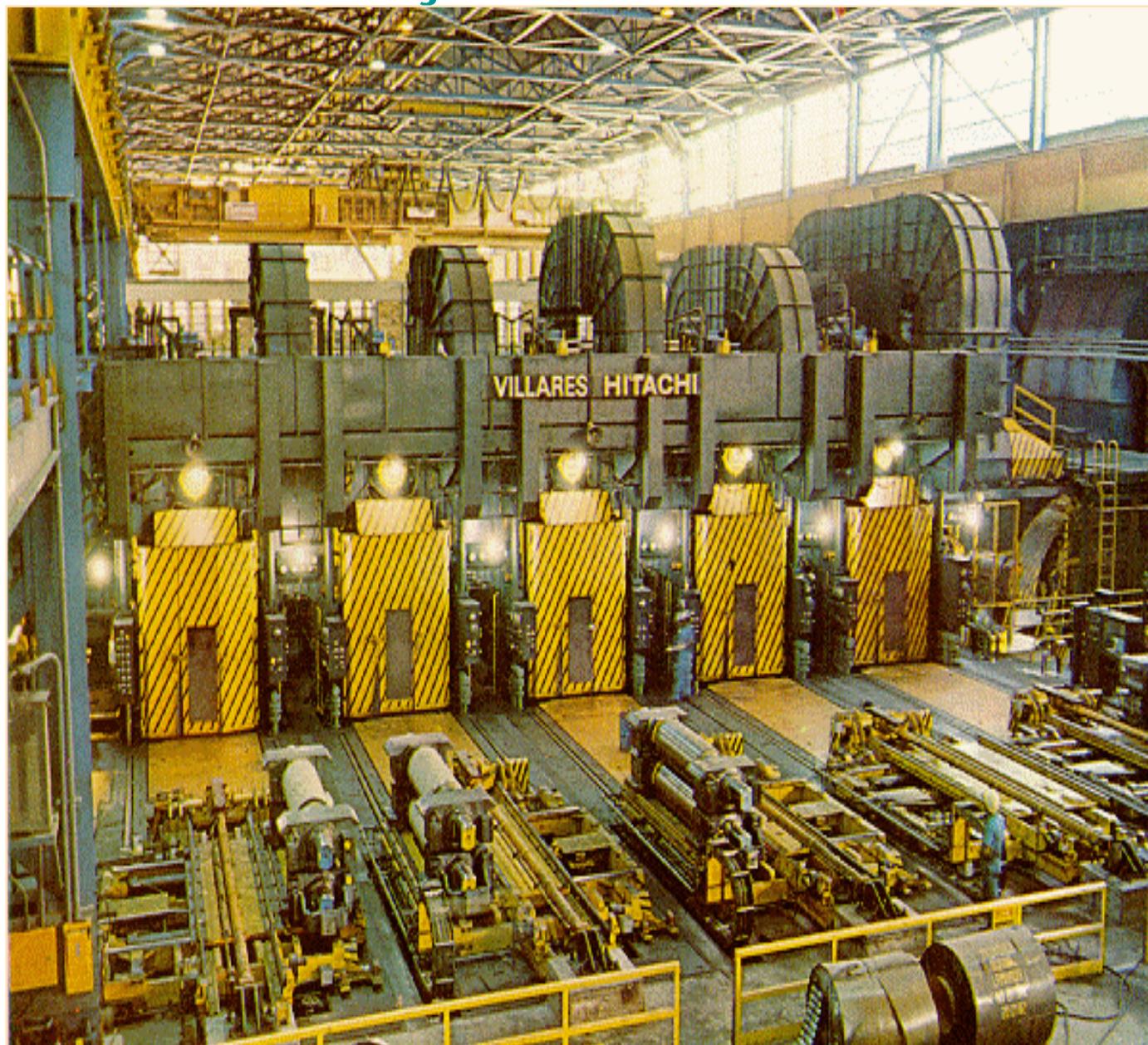
É necessário planejar a redução de espessura em cada “passe”, Para não forçar excessivamente as “cadeiras”



PMT EP USP

CSN

# LAMINAÇÃO A FRIO

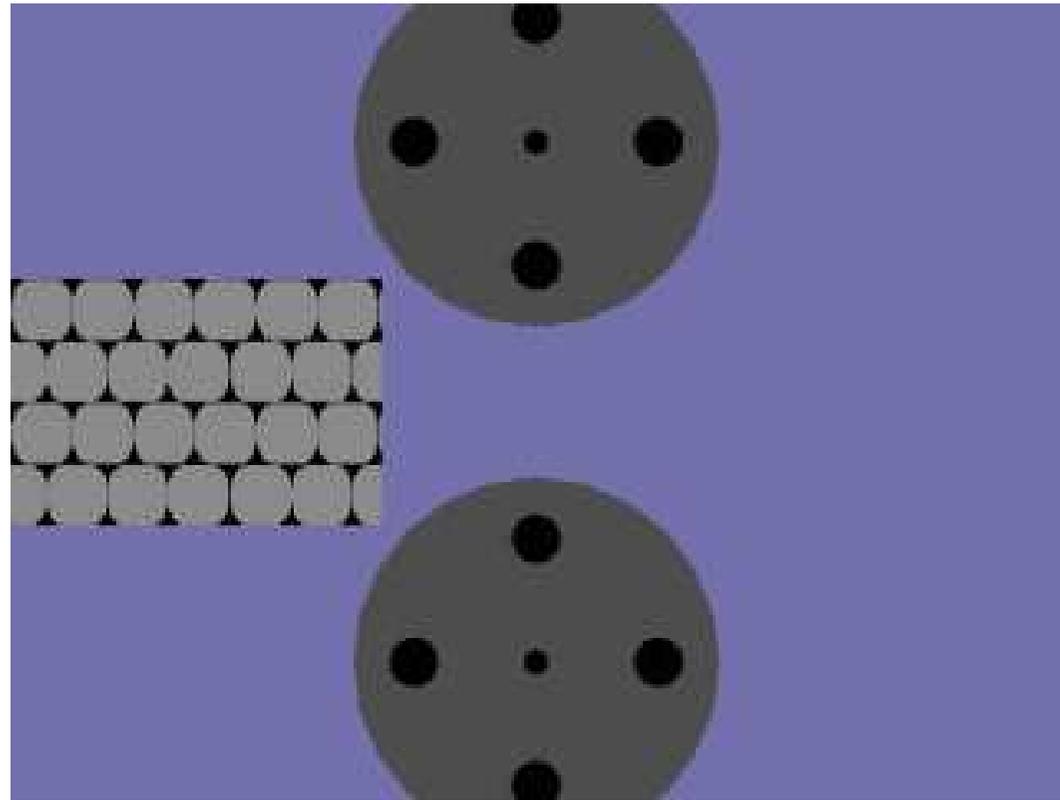




PMT EP USP

# A laminação deforma os grãos

- O que acontece dentro do material quando se deforma?



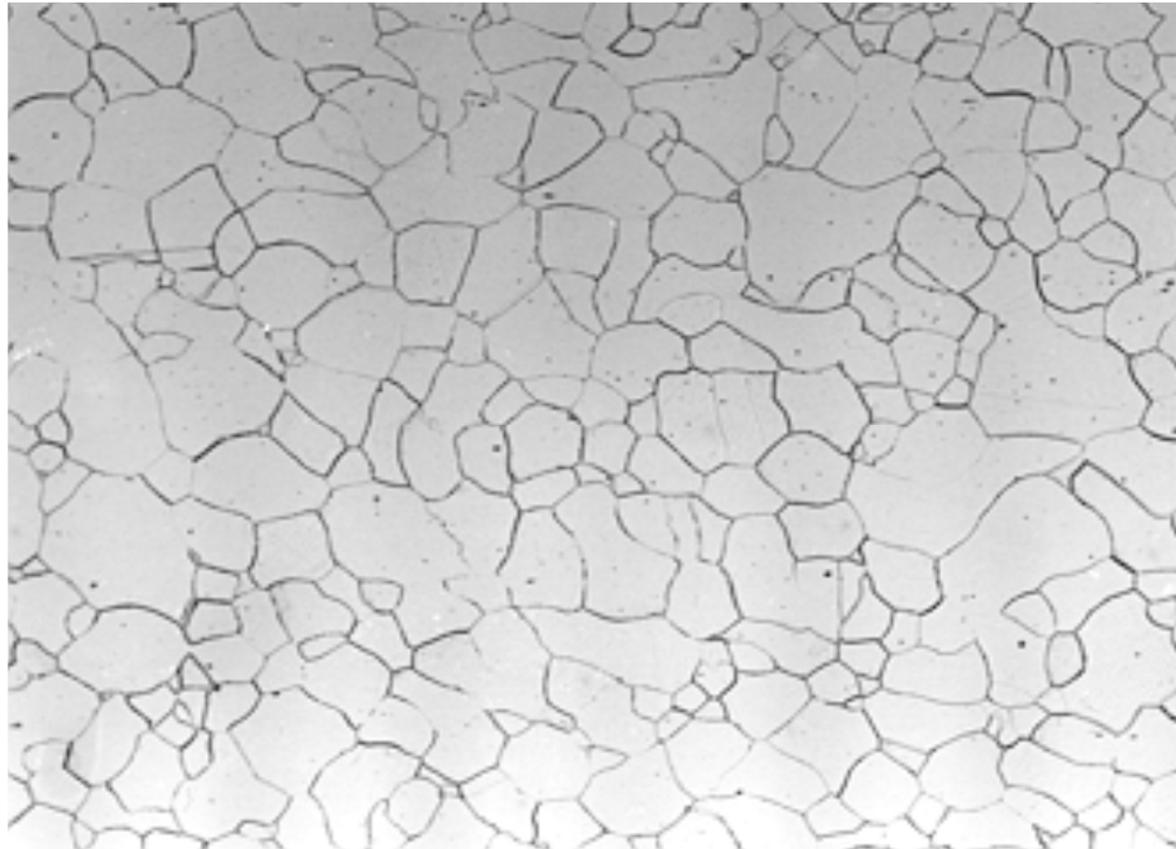
Processamento de aços elétricos  
PMT 3200



## Deformação plástica e microestrutura

PMT EP USP

**10 % de alongamento**



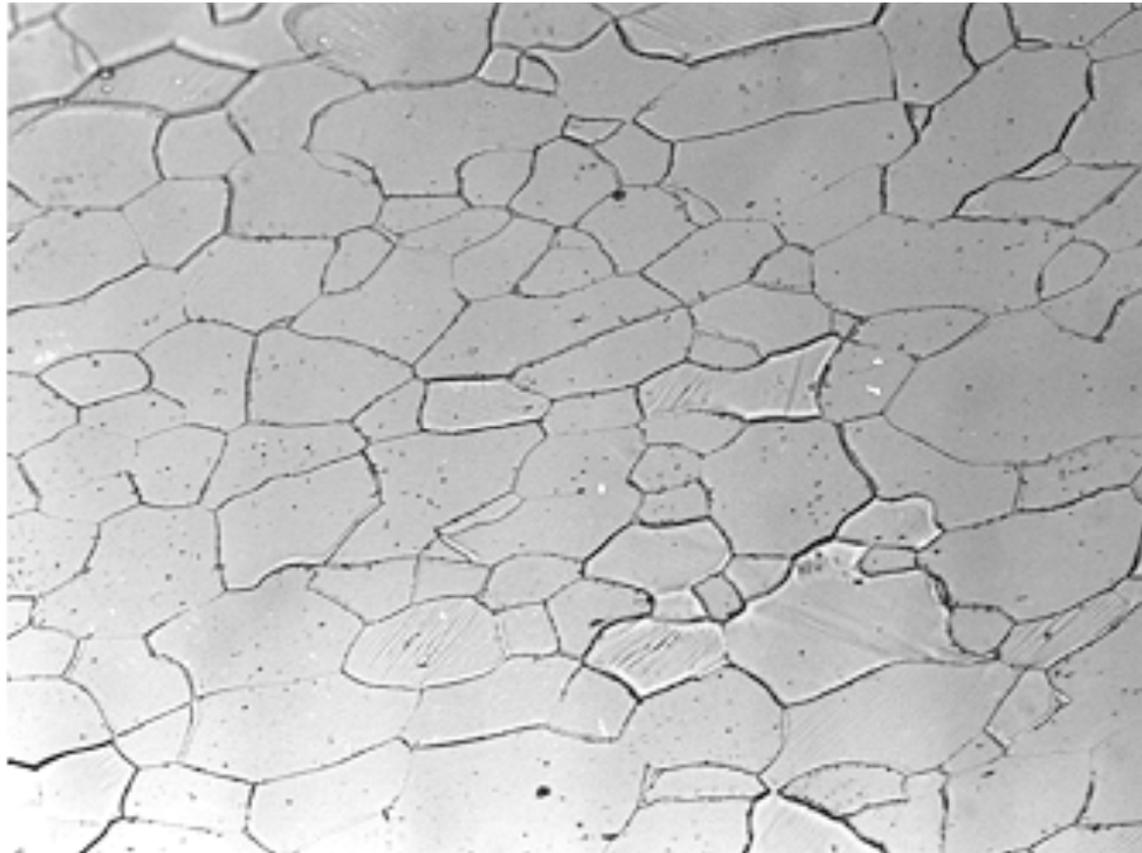
Processamento de aços elétricos  
PMT 3200



## Deformação plástica e microestrutura

PMT EP USP

**20 % de alongamento**



Processamento de aços elétricos  
PMT 3200



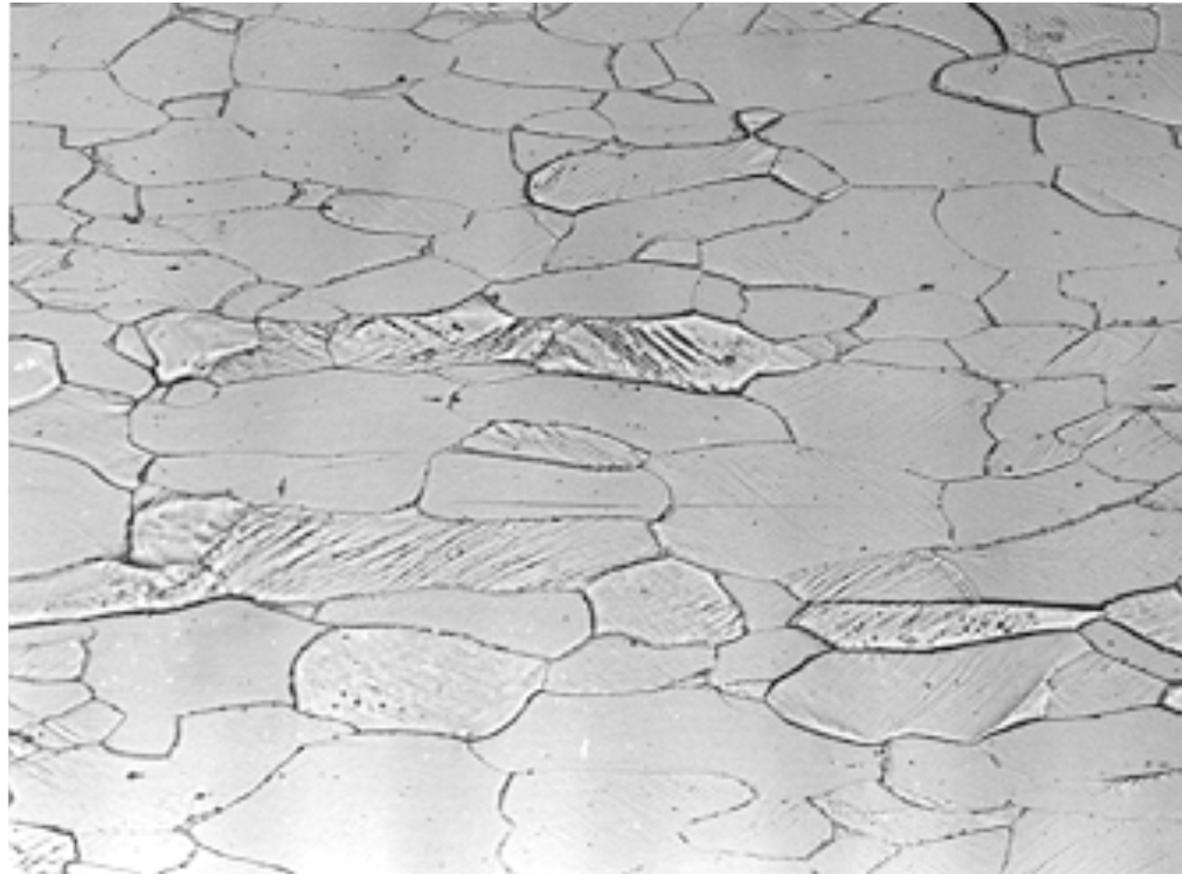
## Deformação plástica e microestrutura

PMT EP USP

**50 % de alongamento**

Muitas discordâncias (é necessário “recozer”)

Regiões dos grãos  
Giram para orientações diferentes:  
textura muda

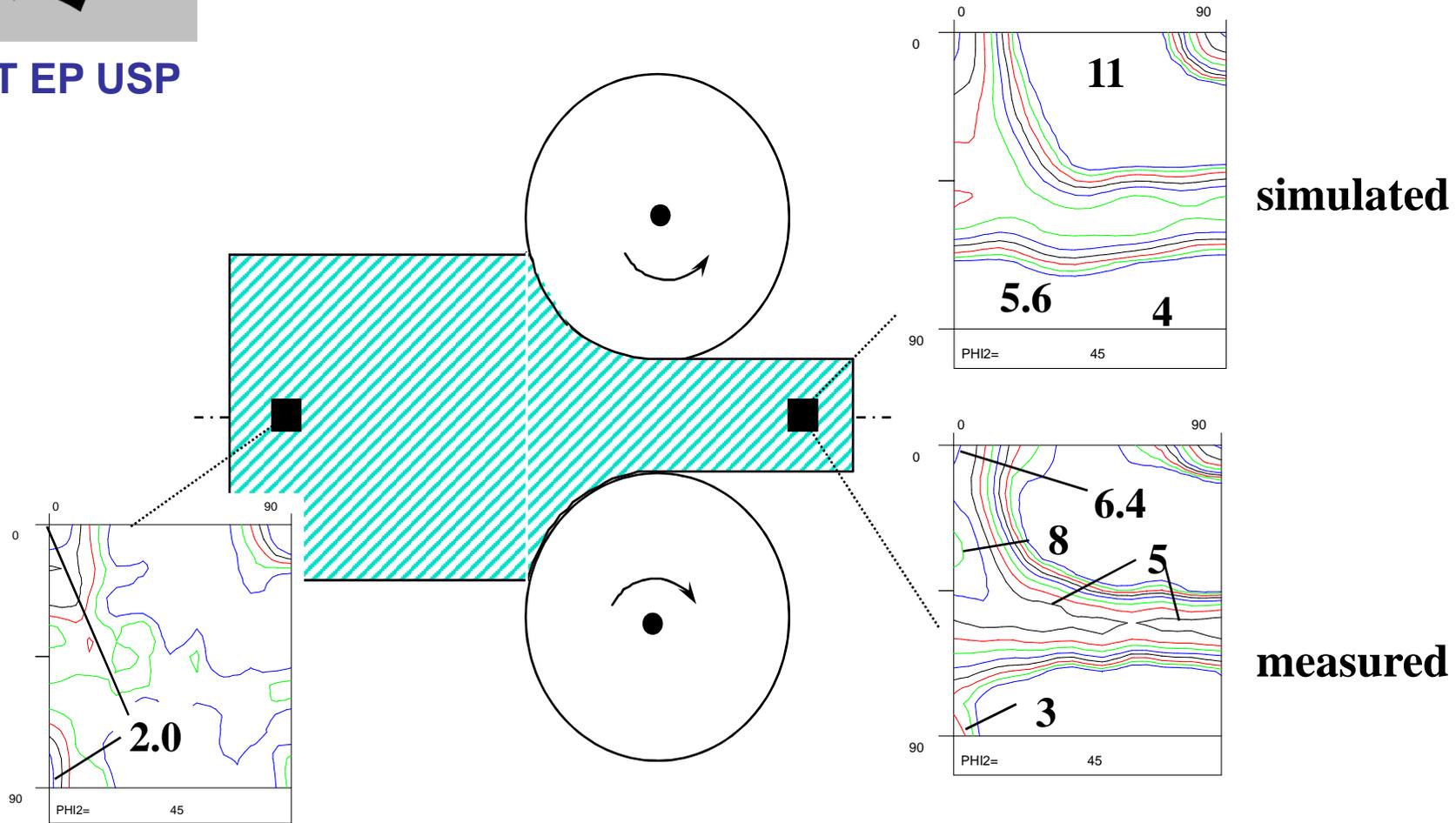


Processamento de aços elétricos  
PMT 3200



PMT EP USP

## Simulação matemática descreve bem a textura do aço laminado



Textura antes da laminação

Textura do material laminado

Processamento de aços elétricos  
PMT 3200

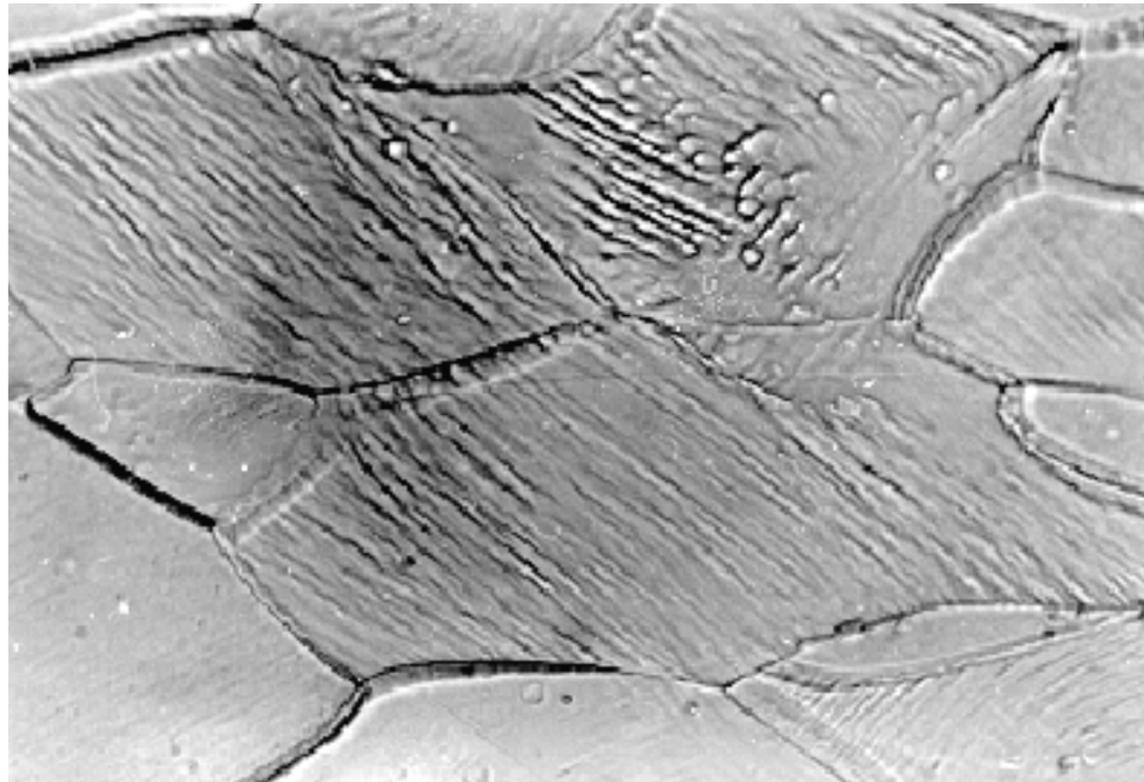
Leo Kestens,  
Un. Gent, Bélgica



## Deformação plástica e microestrutura

PMT EP USP

Surgem bandas de deformação



Processamento de aços elétricos  
PMT 3200



PMT EP USP

# Recozimento



Chapa passa em alta velocidade por forno a 900° C  
Fica 90 segundos lá dentro  
Aquecimento leva à recristalização

Processamento de aços elétricos  
PMT 3200



PMT EP USP

# Recristalização

- O aquecimento do material deformado leva a “recristalização”, ou seja, formação de novos cristais isentos de discordâncias.
- O controle da orientação dos novos cristais ainda é empírico.
- Poucas coisas são conhecidas sobre esse fenômeno.

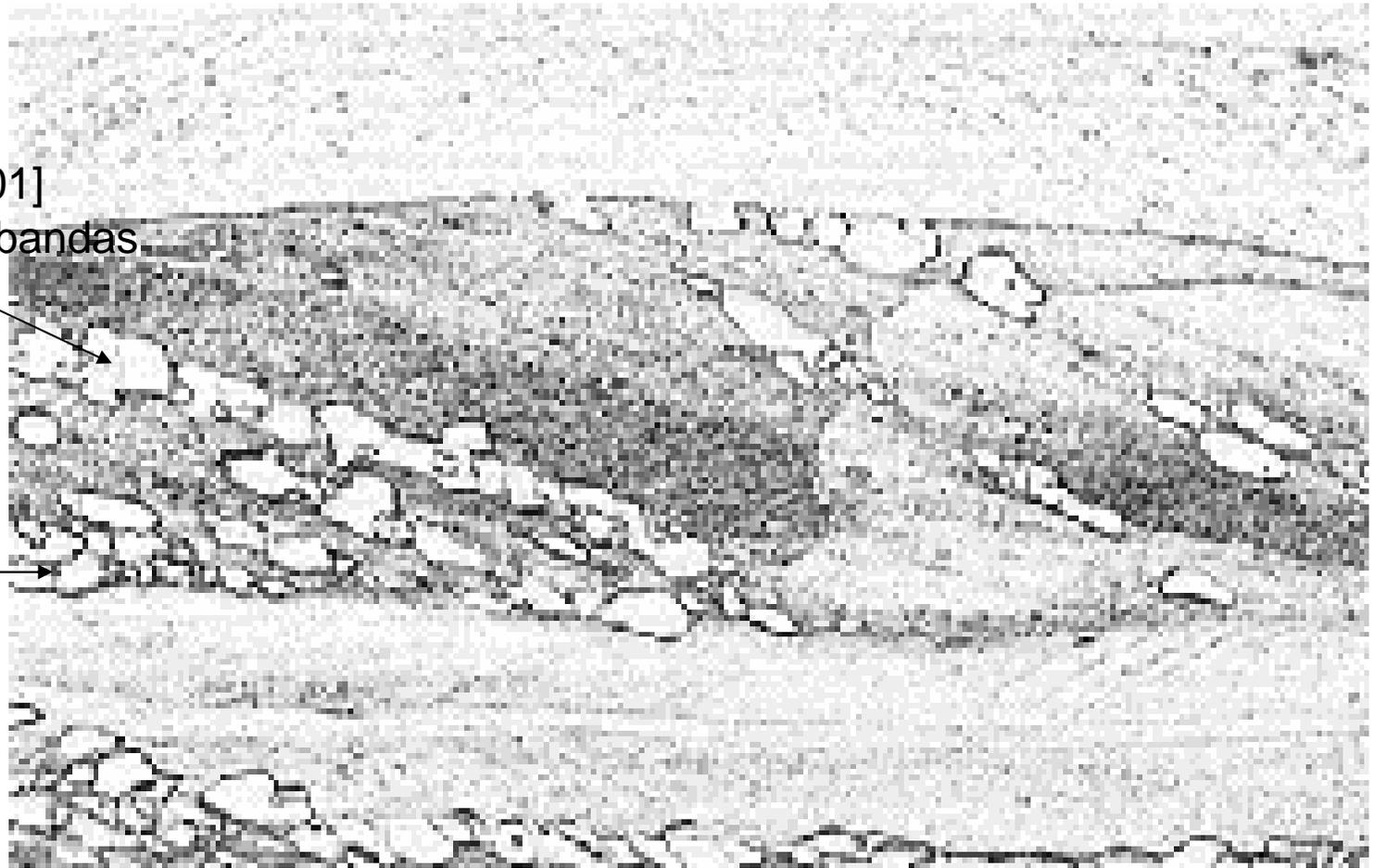


PMT EP USP

# Início da recristalização

Grãos (110)[001]  
Nucleiam nas bandas

Grãos (111)[112]  
Nucleiam  
nos contornos  
de grão



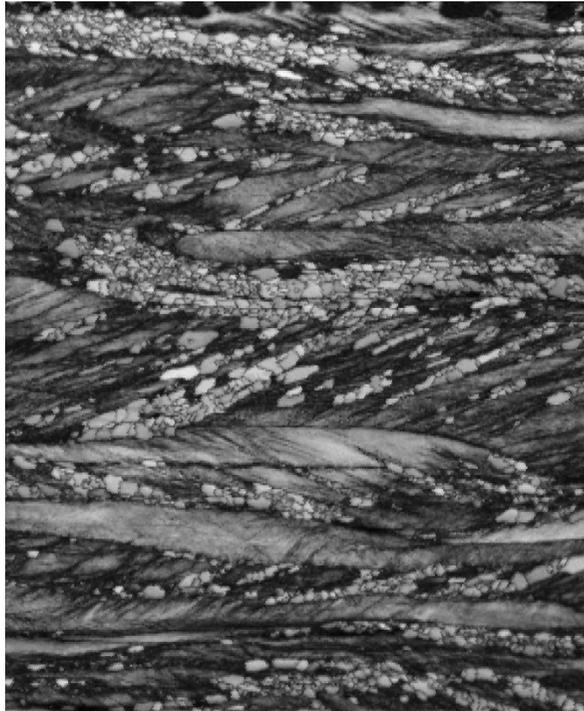
Processamento de aços elétricos  
PMT 3200

Cunha e Paolinelli,  
Acesita

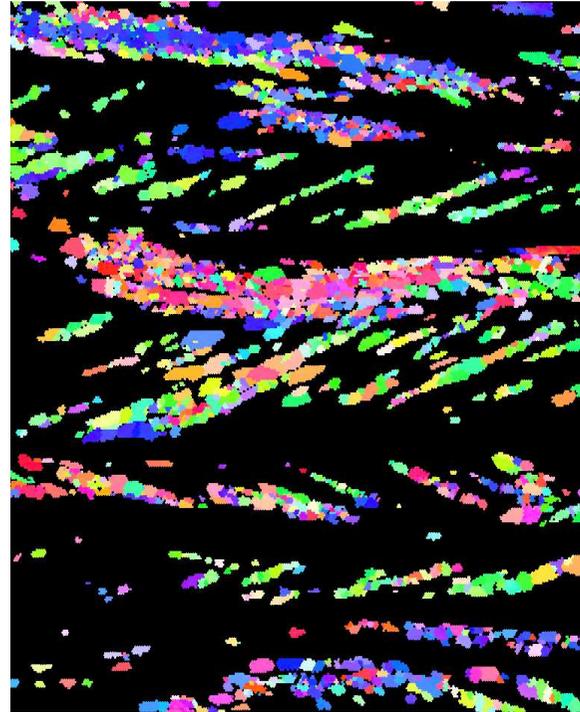


PMT EP USP

# Observação por EBSD

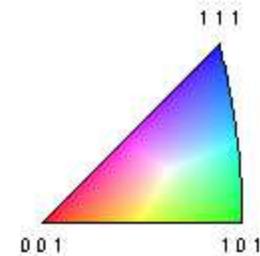


96.00  $\mu\text{m}$  = 60 steps IQ 80.9...956.7, Orientation

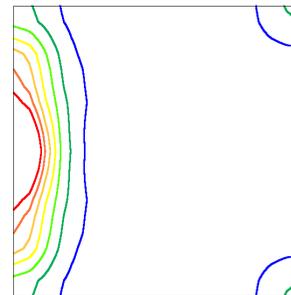


96.00  $\mu\text{m}$  = 60 steps IPF [001]

Grãos verdes são (101)[010]



(Dados de Paolinelli e Cunha, Acesita)



0°



45°

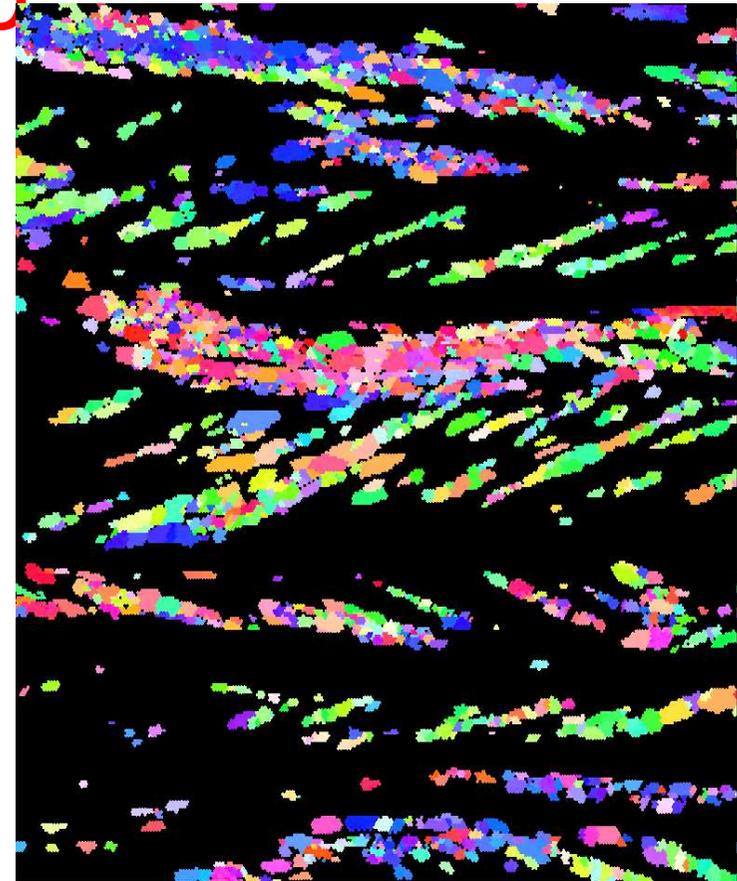


PMT EP USP

# Sacada: aumentar o tamanho de grão antes da laminação a frio

Quanto maior TG do material com 2mm  
Menos contornos de grão existirão,  
Menos grãos (111) serão formados!

Introduzir a etapa de recozimento da BQ



96.00  $\mu\text{m}$  = 60 steps IPF [001]

Processamento de aços elétricos  
PMT 3200



PMT EP USP

# Processamento

Refino do metal líquido

remoção do S e O

Lingotamento

produz placa de 250 x 1200 x Z mm

Laminação a quente

diminui espessura para 2mm

**Recozimento da bq**

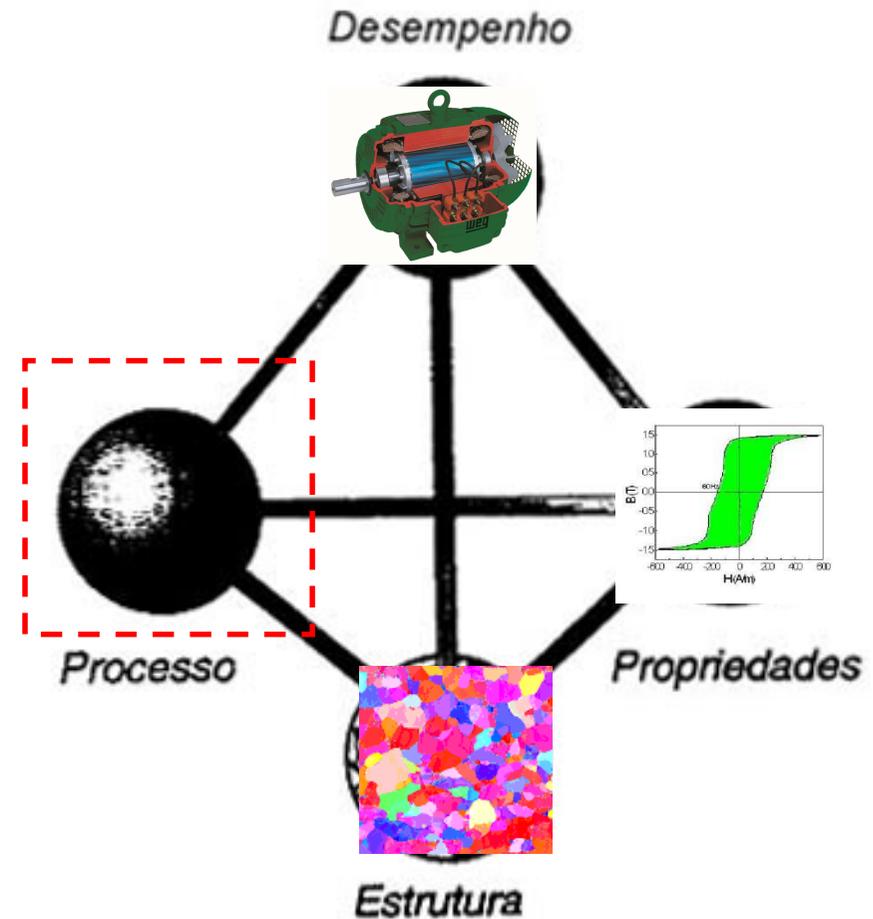
**aumenta TG para 200 $\mu$ m**

Laminação a frio

diminui espessura para 0,5mm

Recozimento final

TG



Processamento de aços elétricos  
PMT 3200

**Nem sempre é possível  
introduzir essa etapa!**



PMT SP



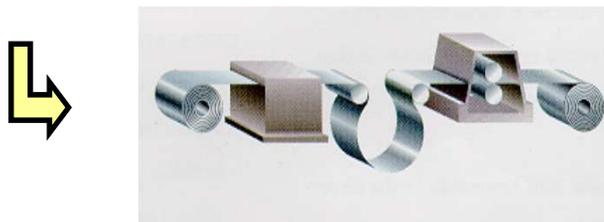
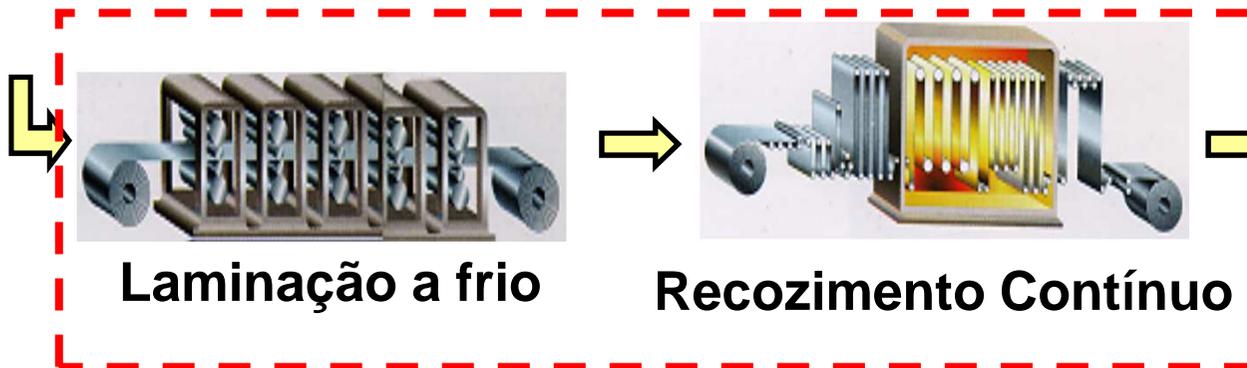
**Aciaria**



**Laminação a quente**



**Decapagem**



**Linha de inspeção  
e acabamento**

**Processamento de aços elétricos  
PMT 3200**

**CSN**



PMT EP USP

# RESUMO

Este exemplo de aplicação busca enfatizar que  
A obtenção de novos produtos, de melhores propriedades,  
Depende do desenvolvimento de novos processos.

No exemplo específico, lembrar da importância da  
Anisotropia magnetocristalina  
para a qualidade magnética do material,  
E como uma mudança no processo altera a textura  
E melhora a propriedade.